

О. М. ГРЕЧКО**СУЧАСНІ АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА 3D-ДРУК.****ОГЛЯД ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ В РІЗНИХ СФЕРАХ ЛЮДСЬКОГО ЖИТТЯ**

Вступ. Актуальним завданням сьогодення є застосування нових технологій і розробок в повсякденному житті з метою покращення як умов існування людства, так і задля зменшення затрат енергоресурсів, матеріалів, часу та інше при виготовленні різноманітних виробів. Одним з перспективних напрямків рішення такого нагального завдання є впровадження останніх досягнень в галузі адитивних технологій в різні сфери людського життя. **Методи.** На основі опублікованого у відкритих інформаційних джерелах численного матеріалу наведено короткий науково-технічний огляд останніх досягнень в області сучасних адитивних технологій як в різних галузях промисловості так і в сферах людського життя. Представлені найвагоміші розробки дослідників з усього світу в галузях медицини та протезування, архітектури та будівництва, проаналізовано технології створення металевих деталей з використанням адитивних технологій. **Результати.** Проведений аналіз прикладів впровадження адитивних технологій в світі показав важливу необхідність недопущення відставання вітчизняної промисловості, а також науки і освіти від актуальних тенденцій застосування 3D-принтерів. Показано переваги і недоліки адитивних технологій у порівнянні з традиційними способами виробництва. **Обговорення.** Робота направлена на ознайомлення вітчизняних фахівців та науковців з можливостями застосування сучасних адитивних технологій в різних секторах промисловості і сферах людського життя. Матеріали статті можуть бути спрямовані для залучення молодих вчених, аспірантів, студентів щодо пошуку нових шляхів використання адитивних технологій та втілення найсміливіших їх ідей і проєктів в реальне життя.

Ключові слова: адитивні технології, 3D-принтер, 3D-друк.

А. М. ГРЕЧКО**СОВРЕМЕННЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И 3D-ПЕЧАТЬ.****ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ СФЕРАХ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ЖИЗНИ**

Введение. Актуальной задачей сегодняшнего времени является применение новых технологий и разработок в повседневной жизни с целью улучшения как условий существования человечества, так и для уменьшения затрат энергоресурсов, материалов, времени и прочее при изготовлении различных изделий. Одним из перспективных направлений решения такой первоочередной задачи является внедрение последних достижений в области аддитивных технологий в различные сферы человеческой жизни. **Методы.** На основе опубликованного в открытых информационных источниках многочисленного материала приведен краткий научно-технический обзор последних достижений в области современных аддитивных технологий как в различных отраслях промышленности так и в сферах человеческой жизни. Приведены значимые разработки исследователей со всего мира в области медицины и протезирования, архитектуры и строительства, проанализированы технологии создания металлических деталей с использованием аддитивных технологий. **Результаты.** Проведенный анализ примеров внедрения аддитивных технологий в мире показал важную необходимость недопущения отставания отечественной промышленности, а также науки и образования от актуальных тенденций применения 3D-принтеров. Показаны преимущества и недостатки аддитивных технологий по сравнению с традиционными способами производства. **Обсуждение.** Работа направлена на ознакомление отечественных специалистов и исследователей с возможностями применения современных аддитивных технологий в различных секторах промышленности и сферах человеческой жизни. Материалы статьи могут быть направлены для привлечения молодых ученых, аспирантов, студентов к поиску новых путей использования аддитивных технологий и воплощения самых смелых их идей и проєктов в реальную жизнь.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-принтер, 3D-печать.

О. М. GRECHKO**MODERN ADDITIVE TECHNOLOGIES AND 3D PRINTING.****OVERVIEW OF RECENT ADVANCES IN VARIOUS SPHERES OF HUMAN LIFE**

Introduction. The current task of today is to apply new technologies and developments in everyday life in order to improve both the living conditions of mankind and to reduce the cost of energy, materials, time, etc. in the manufacture of various products. One of the promising areas for solving such an urgent task is to introduce the latest advances in additive technologies in various spheres of human life. **Methods.** On the basis of numerous material published in open information sources, a brief scientific and technical review of recent advances in the field of modern additive technologies is given in various industries and in human life. The significant developments of researchers from around the world in the field of medicine and prosthetics, architecture and construction are presented, the technology of creating metal parts using additive technologies is analyzed. **Results.** The analysis of examples of the introduction of additive technologies in the world showed an important need to avoid the lag of domestic industry, as well as science and education from the current trends in the use of 3D printers. The advantages and disadvantages of additive technologies compared to traditional production methods are shown. **Discussion.** The work is aimed at familiarizing domestic specialists and researchers with the possibilities of applying modern additive technologies in various industrial sectors and spheres of human life. The article materials can be sent to attract young scientists, graduate students, students to search for new ways to use additive technologies and translate their wildest ideas and projects into real life.

Key words: additive technologies, 3D printer, 3D printing.

Вступ. Нам пощастило жити в такий час, коли майже не сьогодні ми стаємо свідками неймовірних подій, захмарних досягнень, нових відкриттів. І це стосується ледве не всіх галузей та сфер людського життя – наука, техніка, медицина, спорт, культура тощо. Вже нікого не здивуєш ані телевізорами з гнучким екраном, що згортаються в рулон, ані хатніми роботами-помічниками, що виконують за Вас буденну роботу, ані вирощуванням людських «органів-запчастин» для

хворих. І якщо у нашому дитинстві ми запускали у повітря літаки з паперу, то зараз вже частіше можна побачити над головами безпілотні літальні апарати – дрони. А в Японії дронів у повітрі з'явилося так багато, що місцева поліція була вимушена запускати вже свої дрони зі спеціальною сіткою для відловлювання потенційно небезпечних екземплярів! І ці приклади досягнень можна продовжувати нескінченно довго. Чого лише варті фантастичні проєкти відомого Ілона

© О.М. Гречко, 2019

Маска з запуском надважкої ракети-носія Falcon Heavy, вакуумним потягом та тунелем Hyperloop та автомобільним тунелем Boring! Все це ще декілька років тому було прийняти лише за сюжет фантастичного голлівудського фільму, а зараз це наша з Вами реальність! Так само в наше життя входить і нова (як для України, хоча їй вже понад 30 років [1-6]) технологія зі створення тривимірних об'єктів – 3D-друк. І входить не поступово, а, можна сказати, вривається з небувалою швидкістю.

Взагалі, технології створення тривимірних об'єктів можна поділити на субтрактивні (від англ. *to subtract* – віднімати) та адитивні (від англ. *to add* – додавати) технології. Прикладами субтрактивних технологій є усі різновиди механічної обробки заготовок з металу, деревини, пластмаси, глини, каменю тощо – токарна обробка, фрезерування, шліфування, полірування та інші, у яких з попередньо відібраної заготовки шляхом віднімання усього зайвого створюється готова деталь. Протилежністю субтрактивним технологіям є адитивні технології, при яких майбутні деталі створюються на вільній області простору (платформі, яка спочатку є порожньою) шляхом пошарового нарощування і додавання певного матеріалу у потрібні місця. Саме до адитивних технологій і відносяться технології, що застосовуються при 3D-друку на 3D-принтерах – пристроях, що є різновидами промислових роботів, які здатні створювати об'ємні об'єкти шляхом пошарового нанесення матеріалу на певні місця за заданою керуючою програмою.

Метою роботи є складання на основі опублікованого у відкритих інформаційних джерелах матеріалу короткого науково-технічного огляду останніх досягнень у сфері сучасних адитивних технологій та 3D-друку в різних сферах людського життя.

У роботі [6] було детально розглянуто найбільш розповсюджені адитивні технології 3D-друку з розширеним описом принципу створення деталей і аналізом різних моделей 3D-принтерів, розглянуто різновиди матеріалів для 3D-друку і особливості протікання самого процесу друку, проаналізовано основні переваги та недоліки технологій 3D-друку. З того моменту і по теперішній час в світі ледве не кожен день з'являються нові цікаві розробки у сфері 3D-друку, з деякими з яких варто познайомитись більш детально.

Огляд досягнень у сфері 3D-друку за останні роки.

Медицина. Організація Médecins Sans Frontières (MSF) («Лікарі без кордонів») кілька років тому в столиці Йорданії м. Амман надала 3D-друковані протези (рис. 1) жертвам війни з ампутованими кінцівками [7].

На сьогоднішній день створено 16 друкованих протезів для пацієнтів з Ємену, Сирії, Іраку, Газі та з інших місць – зон військових конфліктів, де практично недоступне лікування на стаціонарі. Зі слів пацієнтів протези, що виготовлені традиційним способом, є надто важкими і неефективними для виконання повсякденних завдань. Крім того, виробництво протеза руки обійдеться приблизно в 2000 доларів. А завдяки технології 3D-друку, такий же протез можна створити з пластику (термопластичного поліуретану) всього за 50 доларів. В майбутньому планується виробляти такі

протези за допомогою 3D-друку та 3D-сканеру в важкодоступних місцях, де немає надійної системи охорони здоров'я, наприклад, в зонах військових конфліктів. Це, нажаль, є актуальним питанням і для нашої країни.



Рис. 1. Протез руки, виготовлений за допомогою 3D-друку

Британська компанія Open Bionics, що з 2014 р. займається розробкою і виробництвом біонічних протезів з використанням технологій 3D-друку, у 2018 р. почала випускати кастомні протези для дорослих і дітей у віці від 9 років з ампутацією нижче ліктьового суглоба [8] (рис. 2). Компанія отримала ліцензії світових компаній (Disney, Marvel і Pixar) на використання творчості цих брендів в оформленні штучних рук серії Hero Arm, так що пацієнти зможуть замовити протези в стилі улюблених героїв зі світу кінематографу.

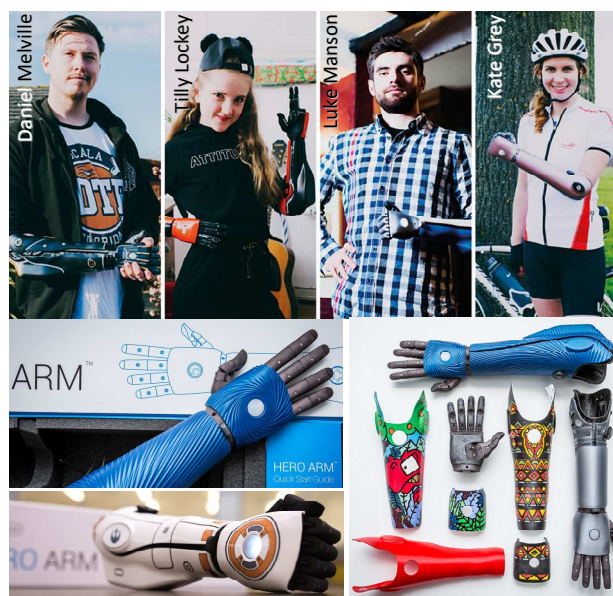


Рис. 2. Біонічні протези рук компанії Open Bionics

Ці протези керуються за допомогою міоелектричних датчиків і здатні виконувати доволі широкий набір рухів і хватів. Точність рухів регулюється за рахунок зміни швидкості приводів, що дозволяє, наприклад, навіть оперувати деталями з конструктору LEGO. Вантажопідйомність дорослої версії протезу досягає 8 кг при масі самого протеза не більше 1 кг. Штучні руки розробляються під кожного пацієнта індивідуально за рахунок 3D-сканування кукси і 3D-

друку окремих елементів. Заряду акумуляторів вистачає на повний день експлуатації. Вартість біонічного протезу складає приблизно 7000 доларів.

Ще одним прикладом успішного застосування адитивних технологій у медицині є унікальний випадок, що стався у Болгарії у 2018 р. – тамтешні хірурги у софійській міській лікарні «Tokuda Hospital» імплантували 3D-друковане ребро з поліаміду 35-річному хворому Івайлу Іосифову (рис. 3,а), який став першим болгарським пацієнтом, який отримав надруковане на 3D-принтері ребро [9] (рис. 3,в).

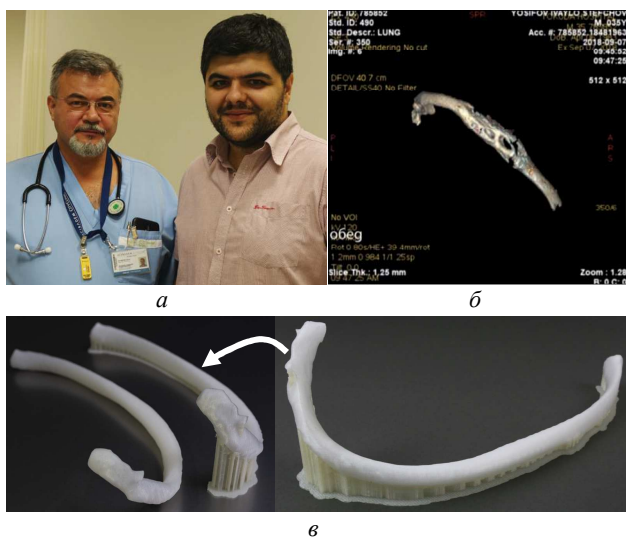


Рис. 3. а – на фото праворуч – пацієнт І. Іосифов, ліворуч – кардіохірург; б – хворе ребро; в – 3D-друковане ребро з підтримуючими структурами та без них

Заміна кістки 3D-імплантатом знадобилася з огляду появи пухлини (рис. 3,б), що була викликана вродженою хворобою і яка була здатна привести до суттєвих проблем з диханням. Штучне полімерне ребро було виконано з одного з різновидів поліаміду, що отримав сертифікат безпеки у США. Точна цифрова модель була отримана за допомогою 3D-сканування хворого ребра, яке було успішно видалено. У якості 3D-принтера використовувався 3D-принтер польської компанії 3DGence [10]. По завершенні 3D-друку і безпосередньо перед встановленням імплантат ребра ретельно стерилізували окисом етилену, гамма радіацією і нагріванням до 140 °С. Зі слів менеджера компанії 3DGence Філіпа Турчінські «...3D-принтери їх виробництва забезпечують високу об'ємну точність, що стало вирішальним фактором у проведенні операції, а індивідуальне моделювання ребра дозволило дуже точно встановити імплантат на місце видаленої кістки з повною відповідністю за формою, кривизною, шириною і товщиною» [10]. В свою чергу, проф. Мінчев, завідувач відділенням кардіохірургії лікарні «Tokuda Hospital» зазначив: «Це нова ера в реконструкції грудних стінок для пацієнтів з пухлинами, які вимагають видалення кістково-хрящових структур. Матеріал, що використовувався, довів свою біосумісність, а неймовірна точність відтворення дозволяє проводити резекції грудних клітин і заміну кісткових

тканин імплантатами індивідуального дизайну» [10].

Біль у колінах...Що може бути гірше! Але і тут на допомогу прийшли адитивні технології – новий матеріал дозволяє друкувати навіть колінні хрящі-імплантати на 3D-принтері [11]!

Вчені американського університету Duke University [12] створили новий матеріал, який імітує хрящ людини і може бути використаний хірургами для 3D-друку імплантатів індивідуальної форми згідно анатомії кожного пацієнта задля заміни пошкоджених частин колінного суглоба. Відомо, що коліна людей мають пару менісків – хрящів у формі місячного серпа, які слугують у якості амортизаторів. Але за роки навантажень ці важливі частини суглоба можуть або зноситись або ж бути серйозно пошкоджені в результаті навіть одного невірному руху під час гри, наприклад, у футбол або теніс. Результатом стають неймовірно болючі відчуття і збільшений ризик розвитку артриту.

Розробники стверджують, що їх матеріал на основі гідрогелю (рис. 4,а) є першим у світі, який за міцністю і еластичністю повністю відповідає хрящу людини, при цьому залишаючись стабільним усередині тіла і який дозволяє використовувати його в процесі 3D-друку. Для підтвердження на практиці своєї розробки дослідники використовували 3D-принтер за 300 доларів для друку індивідуальних менісків для пластової моделі коліна (рис. 4,б).

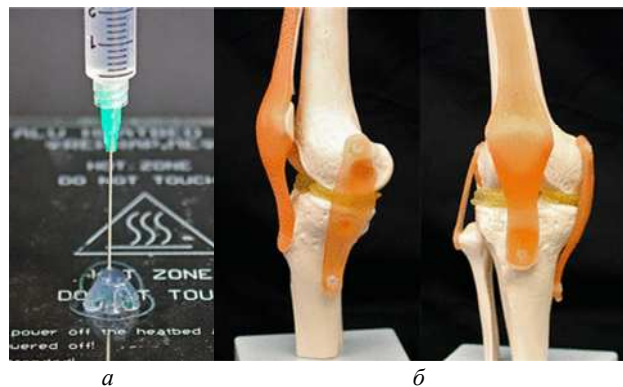


Рис. 4. 3D-друк розробленим гідрогелем (а) моделі меніску колінного суглоба (б)

Один з авторів роботи [12] професор В. Wiley зазначив, що: «...ми розробили тепер можливим для всіх досить простий і відносно недорогий процес друку імплантатів, дуже близьких за своїми медичними властивостями до хряща людини». Варто відзначити, що це дійсно революційне досягнення – розірвання або пошкоджені меніски дуже примхливі до процесу самозагоювання. Хірургам часто доводиться їх або частково або повністю видалити, а існуючі до цього імплантати або не відповідали за міцністю і еластичністю людському «оригіналу», або відрізнялись поганою біологічною сумісністю і перешкоджали загоєнню пошкодженого суглоба.

Гідрогелі останнім часом все частіше застосовуються в якості матеріалів для заміни хрящів, оскільки є дуже схожими за молекулярною структурою на хрящ людини і є біологічно сумісними. Однак вченим до сих пір не вдалось створити саме такий гідро-

гель, який би відповідав характеристикам хряща людини і при цьому відрізнявся можливістю ефективного застосування в технології 3D-друку. Остання умова є дуже важливою, оскільки людські меніски мають доволі складну форму і у різних людей сильно відрізняються. І саме 3D-друк дозволив створювати індивідуальні імпланти, які будуть краще приживатися.

Значним досягненням у медицині є розробка вчених з Toronto University, що створили портативний 3D-принтер для друку шкірного покриву [13]. Він насамперед призначений для швидкого відновлення пошкоджених ділянок шкіри шляхом нанесення на уражені зони штучного покриву (рис. 5). Пристрій дозволить самостійно обробити рани у вигляді порізів або опіків з пошкодженням до підшкірної основи (гіподермісу), не вдаючись при цьому до послуг кваліфікованого медичного персоналу. Цей портативний 3D-принтер важить менше 1 кг, а зовні і за принципом функціонування нагадує відомий маркувальний етикет-пістолет. Цікаво, що даний 3D-принтер не вимагає зразка епідермісу хворого, так як для формування шарів тканини вченими були використані так звані «біочорнила» [14]. Даний матеріал потрапляє на шкіру у вигляді смужок, схожих на лейкопластир, але відрізняються від нього в'язкістю через присутність у складі біочорнил альгінової кислоти (альгінат – природний біополімер з бурих водоростей). В основі ж штучної шкіри лежать живі клітини в сукупності з колагеном (структурний білок, що є найбільш поширеним білком ссавців і основним компонентом сполучної тканини) і фібрином (нерозчинний білок, що утворюється у печінці при згортанні крові) [15]. На попередньому етапі 3D-принтер був успішно протестований на тваринах: в ролі піддослідних виступили спочатку щури, а потім свині. Наступним етапом плануються клінічні випробування вже за участю людини.



Рис. 5. 3D-принтер для друку пошкодженого шкірного покриву

Не залишилась без уваги дослідників ще одна частина людського тіла – око. Так, вченим англійського університету Newcastle University [16] у травні 2018 р. вперше вдалось створити рогівку людського ока за допомогою біочорнил та 3D-принтера [17]. Вчені Abigail Isaacson, Stephen Swioklo, Che J. Connon (рис. 6) розробили експериментальну методику, що у недалекому майбутньому дозволить допомогти мільйонам людей, які по декілька років чекають на проведення операції по трансплантації рогівки ока.

Основою нової методики є розробка вченими унікального матеріалу – біогелю – комбінації здорових стовбурових клітин рогівки донора з колагеном і альгінатом [17], який дозволяє зберігати стовбурові клітини живими. При цьому сам матеріал виявляється досить жорстким, щоб зберігати форму, але, при цьому, до-

сить м'яким, щоб його можна було при 3D-друці видавити через сопло 3D-принтера. Тривалість самого процесу друку рогівки ока людини складає всього 6 хвилин, але попередньо проводиться сканування очей пацієнтів задля уточнення необхідних розмірів.



Рис. 6. 3D-друк рогівки ока (а) та двоє з авторів розробленої методики (б) – S. Swioklo (ліворуч) та C.J. Connon (праворуч)

Наступним етапом досліджень є проведення додаткових тестувань, проходження необхідних етапів медичних сертифікацій тощо. Тому поки що пацієнтам доведеться чекати ще кілька років, перш ніж виготовлені на 3D-принтері рогівки будуть офіційно доступні. Але вже сам факт їх створення дає неймовірну надію знову побачити світло хворим з серйозними порушеннями зору.

Як бачимо, медицина – це одна зі сфер людського життя, у якій адитивні технології та 3D-друк знайшли чи не найбільше застосування. І, як свідчать численні публікації, що з'являються у відкритому інформаційному просторі ледве не щодня, темпи наукового та технічного розвитку та втілення нових ідей 3D-друку у медицині будуть тільки зростати.

Ще однією областю людського життя просто таки з шаленим темпом розвитку адитивних технологій є архітектура та будівництво.

Архітектура. У Китаї у січні 2019 р. завершилися роботи над найдовшим і найважчим пластиковим мостом в світі (рис. 7). Проект здійснено будівельною компанією Shanghai Construction Group за підтримки розробника промислових адитивних систем Coin Robotics Technology і виробника витратних матеріалів для 3D-друку Polymaker.

Надрукована на 3D-принтері конструкція довжиною 15.25 м, шириною 3.8 м, висотою 1.2 м та масою 5.8 т встановлена в технопарку Taoru Smart City шанхайського району Путо [18]. Міст надрукований відразу одним цілим, без необхідності в подальшому складанні на місці встановлення, на великоформатному FDM 3D-принтері з робочою областю друку розміром 24×4×1.5 м. Вартість оцінюється в 2.8 мільйона доларів. Роботи над мостом почалися в листопаді 2018 р. Безпосередньо на 3D-друк мосту, не рахуючи фінішну постобробку, було витрачено 35 днів. Розрахунковий термін експлуатації мосту – 30 років. Замість бетону в конструкції мосту був використаний інженерний пластик з додаванням скловолокна для посилення конструкції (так званий ASA-пластик – гранулят акрилонитрил-стирол-акрилату з 12.5 % вмістом армуючого скловолокна). Цей пластик близький за характеристиками до відомого ABS пластику, але відрізняється від нього підвищеною стійкістю до ультра-

трафіолетового випромінювання, а тому є більш прийнятним для експлуатації на відкритому повітрі. Конструкція мосту витримує навантаження в 250 кг (тобто еквівалент 3-4 дорослих людей) на 1 м². Застосування технології дозволяє скоротити терміни будівництва і зменшити до мінімуму відходи матеріалів.



Рис. 7. Найдовший і найважчий надрукований на 3D-принтері пластиковий міст (м. Шанхай, Китай)

Будівництво. Окремим напрямком адитивних технологій є застосування їх у будівництві приватних будинків, або навіть цілих кварталів. Вже існує багато прикладів як start-up проектів так і професійних компаній, що пропонують свої послуги у будівництві власного житла за допомогою 3D-принтеру. Наведемо декілька цікавих прикладів.

І знову дивують представники Піднебесної! Слідом за найдовшим і найважчим пластиковим мостом, про який мова йшла вище, у тому ж м. Шанхай нещодавно «надрукували» і рекордний за довжиною залізобетонний варіант – 26.3 м! Зовнішній вигляд нового мосту, за задумом архітекторів, повинен в загальних рисах повторювати одну з візитівок Китаю – відомий міст Аньцзи – найстаріший міст довжиною 50.8 м, що був зведений приблизно у 605 році та який зберігся практично у первісному вигляді і по цей день (рис. 8).

Якщо на будівництво стародавнього кам'яного моста пішло одинадцять років, то залізобетонний аналог народився на світ за допомогою 10 робочих за 450 годин. 68 бокових та 64 нижніх окремих блока друкувалися двома 3D-принтерами та були зібрані і встановлені на підготовлену заздалегідь сталеву арку. Також в конструкцію моста вбудовані електронні датчики, які слідкують за станом мосту та відстежують навантаження і можливий зсув. Отримані дані будуть використовуватися в наступних проектах, серед яких плануються не тільки мости, а й житлові будинки.

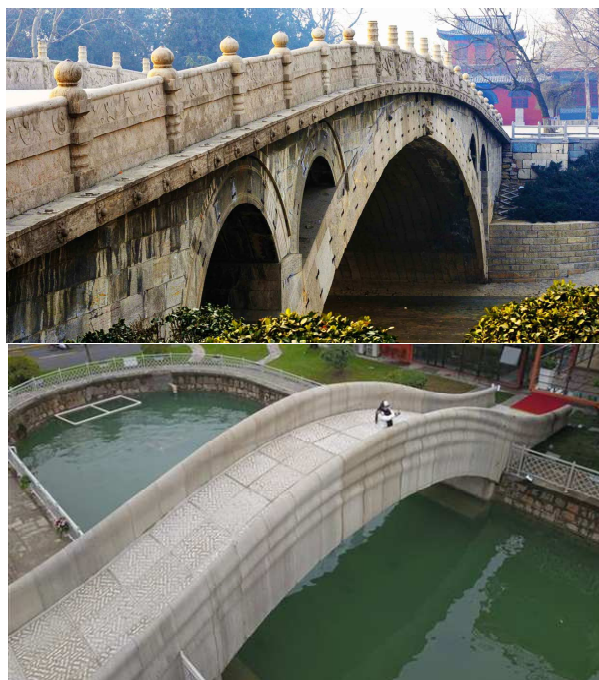


Рис. 8. Найстаріший міст Аньцзи (зверху) та найдовший бетонний міст, надрукований на 3D-принтері (знизу)

Нідерландська будівельна компанія CyBe Construction [19], що спеціалізується на виробництві та використанні 3D-принтерів, що «друкують» бетоном, на виготовленні для них матеріалів та розробці програмного забезпечення для проектування 3D-бетонних будівель, спільно з найбільшою будівельною компанією на Близькому сході Consolidated Contractors Company (штат співробітників налічує понад 180 тисяч співробітників!) на замовлення Міністерства з питань житлового будівництва (Ministry of Housing) Саудівської Аравії побудувала прототип однокімнатного будинку загальною площею приблизно 80 м² (рис. 9).



Рис. 9. 3D-друкований будинок у Саудівській Аравії

Будинок складається з 48 елементів – 27 стін і 21 парапету, що були надруковані безпосередньо на місці будівництва у м. Ер-Ріяд протягом лише одного тижня. Будинок оснащений усіма необхідними комунікаціями і готовий до заселення, хоча цей конкретний будинок вводити в експлуатацію не планують – він послужить дослідним зразком для відпрацювання технологій і сертифікації на майбутнє. А плани у місцевої влади грандіозні. Згідно стратегії національного розвитку країни Saudi Vision 2030 та беручи до уваги ріст урбанізації і неодмінний дефіцит доступного житла планується до 2030 року побудувати аж 1.5 мільйона (!!!) недорогих приватних будинків за інноваційними технологіями, такими як 3D-друк з бетону. Вже до 2020 р. планується розселити в індивідуальні житла 60 % населення, а до 2030 р. – 70 %. Будувати

необхідно швидко і дешево, а тому розрахунок робиться як раз на автоматизацію і нові технології, включаючи адитивні.

У якості будівельного 3D-принтеру (3D Concrete printers [19]) використовувався мобільний принтер марки The CyBe RC 3Dp власного виробництва CyBe Construction (рис. 10), а у якості матеріалу – спеціально розроблений цією ж компанією різновид бетону (CyBe Mortar), що адаптований саме до друку на 3D-принтері. Робочий радіус робота-маніпулятора 3D-принтеру, у якості якого використовується маніпулятор виробництва ABB, досягає 2.75 м, при цьому вбудовані домкрати допомагають як стабілізувати платформу під час друку, так і піднімають 3D-принтер для друку конструкцій заввишки до 4.5 м. Мобільність 3D-принтеру полягає у тому, що поки надрукований бетон твердіє, апарат можна швидко пересунути на нове місце і продовжити роботу завдяки гусеничному шасі, хоча прямо на ходу пристрій не друкує, принаймні поки що. Швидкість друку бетонних шарів завтовшки 30 мм складає до 200 мм/с, при цьому для обслуговування апарату досить усього двох операторів.

from 180 000 Euro

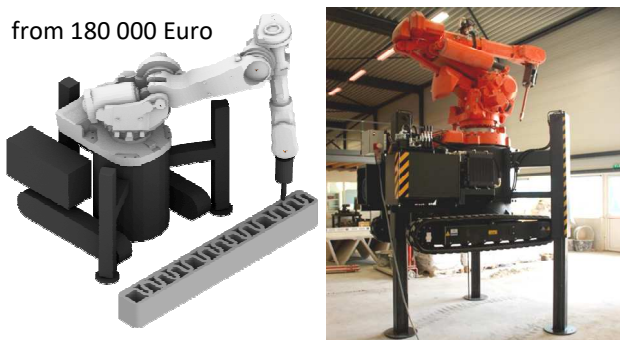


Рис. 10. Бетонний 3D-принтер The CyBe RC 3Dp виробництва CyBe Construction

Декілька слів варто сказати про бетон для 3D-друку марки CyBe Mortar, а точніше – спеціально розроблену швидкозастійну суміш. Оскільки це не просто бетон в класичному розумінні цього терміну. Як заявляють самі виробники цього диво-матеріалу [20], на відміну від інших марок бетону (наприклад, від відомого Portland Cement), їх матеріал розроблений, як було зазначено раніше, саме до друку на 3D-принтері. З офіційних джерел [21] та проведених компанією ретельних досліджень, результати яких опубліковано у вельми солідних виданнях [22, 23], відомо, що бетон марки CyBe Mortar схоплюється вже за 5 хвилин і досягає своєї структурної міцності за 1 годину. Звичайний бетон, що заливається в опалубку, зазвичай може твердіти протягом декількох днів. Але як бути у випадку застосування бетону для 3D-друку? Адже при цьому опалубка не застосовується! При відсутності «опори» надрукований шар бетону майже відразу повинен приймати на себе вагу наступних шарів бетону, що друкуються поверх нього. Цією проблемою занепокоївся проф. Akke Suiker з Eindhoven University of Technology, який після тривалих досліджень розробив на основі методу скінчених елементів математичну модель [22] для визначення розмірів і швидкості друку, при яких не відбувається зсув та руйнування конструк-

цій друкованих бетонних стінок. Модель враховує швидкість нанесення друкованих шарів, характеристики твердіння матеріалу, розміри стінок, дає можливість розрахувати структуру з якомога меншим об'ємом матеріалу. Розроблена математична модель успішно пройшла експериментальну перевірку [23] на бетонному 3D-принтері рідної Альма-матер.

Саме на основі цих досліджень був розроблений бетон CyBe Mortar, час дегідратації якого становить лише 24 години порівняно з 28 днями для «традиційного» бетону [20]. Тому подальше оздоблення стін будинку може бути розпочато вже через 24 години після друку, що неможливо з іншими типами бетону – штукатурка просто буде відпадати від стін, фарба також не буде триматись, що суттєво обмежує остаточну фазу завершення проекту. 24 години і 28 днів – різниця відчутна, годі й казати! Зовнішній вигляд бетонних стін після 3D-друку наведено на рис. 11, з якого можна добре побачити пошарову структуру. Видимість шарів кимось може бути віднесена до недоліків, але, по-перше, за допомогою додаткової обробки стіну завжди можна зробити гладкою, а, по-друге, у деяких непоодиноких випадках замовники навпаки бажають залишити стіни у первинному так би мовити вигляді і саме показати структуру шарів, як це було, наприклад, у випадках будівель The R&Drone Laboratory в Дубаї та The 3DHousing05 у Мілані.

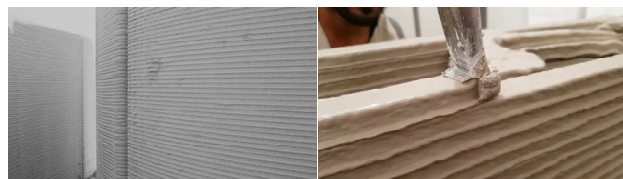


Рис. 11. Пошарова структура бетонних стін, надрукованих на 3D-принтері

WinSun – це назва ще однієї компанії з Китаю (м. Шанхай), що спеціалізується на виготовленні 3D-друкованих житлових будинків. Прискіпливу увагу слід звернути саме на неї, оскільки вони є одними зі світових лідерів у цій будівельній галузі. У квітні 2014 р. представники компанії WinSun зробили заяву, яка багатьма була сприйнята за жарт – було оголошено про успішний 3D-друк 10 будинків протягом 24 годин з повністю утилізованих матеріалів! Але, коли представники компанії виклали фотографії готових об'єктів з коментарями, усім стало не до сміху. Кожен будинок (рис. 12) площею в 200 м² коштував всього 4800 доларів (авт. – для порівняння наприкінці 2010 р. за одну лавку для станції метро «Олексіївська» влада Харкова заплатила 3600 доларів [24]. No comments, як кажуть).

Такі складові будинку як каркас і стіни були надруковані окремо одна від одної на величезному 3D-принтері довжиною 32 м (за іншою інформацією – цілих 150 м!), шириною 10 м і висотою 6.6 м. Фотографувати чудо-принтер суворо заборонено – доступ до нього мають лише близько сотні спеціально навчених співробітників, які пройшли ретельну перевірку на ідейну свідомість.



Рис. 12. Пошарова структура бетонних стін, надрукованих на 3D-принтері

Після того як деталі повністю висушили, вони були транспортовані на місце встановлення в один з районів Шанхаю, де з них зібрали повноцінний будинок. У якості матеріалу були використані спеціально розроблені компанією «чорнила» – утилізований та перероблений будівельний і промисловий бруд, фрагменти знесених будівель, з додаванням піску, цементу, затверджувача та додатково посилені склопластиком. Цей матеріал вийшов доволі міцним, навіть здатен витримувати землетрус (авт. – у скільки балів не коментується) та вітрові навантаження. Надруковані з такого матеріалу будинки є безпечними для навколишнього середовища і дуже економічні з точки зору витрат. На зведення будинків потребувалось набагато менше робочої сили, що і позначилось на невисокій вартості житла.

На початку 2015 р. компанія WinSun пішла ще далі – були надруковані маєток площею 1100 м² та п'ятиповерховий будинок (рис. 13).



Рис. 13. Маєток (зверху) та п'ятиповерховий будинок (знизу), що надруковані на 3D-принтері компанії WinSun

Зрозуміло, що споруди були надруковані з окремих блоків з подальшим збиранням у цільну конструкцію з встановленням металевої арматури, термоізоляції, труб, віконних та дверних рам. Економія будівельних матеріалів склала 60 %, а часу – 70 % у порівнянні з виготовленням подібного будинку традиційними методами. Кількість робітників у будівельній бригаді була зменшена у 5 разів, що також призвело до зменшення як матеріальних витрат так і ризиків отримання виробничих травм.

Компанія WinSun сподівається, що ця технологія дозволить забезпечити недорогим житлом малозабезпечені верстви населення. З метою уявлення масштабів і темпів розвитку, а також актуальності та затребуваності цієї технології на ринку наведемо плани компанії (а вони просто таки фантастичні!):

- у рамках замовлення від уряду Єгипту спорудження 12 міні-фабрик прямо в пустелі для використання місцевого піску для виробництва будівельних матеріалів для зведення відразу 20000 модульних однопверхових будинків;

- співпраця з урядом Іраку задля відновлення зруйнованих в ході бойових дій будівель та будівництва приблизно 10000 будинків на 3D-принтері, а також колодязів і септиків;

- у Саудівській Аравії місцевим будівельним компаніям планується надати в оренду 100 будівельних 3D-принтерів WinSun для будівництва 3D-друкованих будівель загальною площею 30 млн. квадратних метрів для друку доступного житла для відносно бідних верств населення. Вартість контракту оцінюється в 1.5 млрд. доларів. Саме технологія 3D-друку цементними сумішами відмінно поєднується з жарким і сухим кліматом Саудівської Аравії;

- будівництво по всьому Китаю приблизно 100 фабрик, на яких будівельне сміття буде перероблятися в бетонні «чорнила» для 3D-принтерів;

- замовлення на 17 нових будівель від китайських компаній. Також будівництво автобусних зупинок, публічних туалетів, лавок для парків, меблів, різних елементів інтер'єру (стілці, світильники тощо).

Як бачимо, застосування 3D-друку при будівництві житла – це чи не наймасовіша галузь застосування адитивних технологій. Мета проведення такого детального огляду саме будівельного напрямку застосування 3D-друку полягає у перспективності її застосування на теренах України, на відміну, наприклад, від медичного напрямку, який потребує значних фінансових вливань, пов'язаних з необхідністю проведення цілої низки ретельних досліджень, експериментів, тестувань, ліцензувань, сертифікацій тощо. А це порівняно довгий процес, матеріальна вигода від втілення якого у життя може з'явитись у не найближчому майбутньому. Це йде у протиріч з вітчизняним менталітетом – отримання вигоди якнайшвидше. А 3D-друк бетоном, на думку автора статті, має величезні перспективи у нашій країні, оскільки не потребує відносно великих фінансових затрат, а ось час окупності буде недовгим, оскільки попит на нерухомість та індивідуальне недороге житло зростає з кожним днем. Як держава так і усі небайдужі благодійні організації

також не мають стояти осторонь, а повинні зацікавитись сучасними будівельними адитивними технологіями у зв'язку з ситуацією в країні та наявністю великої кількості вимушених переселенців з тимчасово окупованих територій, для яких конче необхідно створення гідних умов проживання.

Ось Вам реальний приклад з життя. Американська некомерційна благодійна організація з Кремнієвої долини New Story протягом 2018 р. інвестувала 9 млн. доларів спочатку в start-up проект, а згодом – у повноцінну будівельну компанію ICON (м. Остін, штат Техас), з метою 3D-друку доступних житлових будинків площею близько 60 м² для малозабезпечених верств населення (або постраждалих від природних катаклізмів) спочатку Латинської Америки (серед першочергових країн значаться Гаїті, Сальвадор, Болівія, Мексика), а згодом – всього світу із залученням інших некомерційних організацій та урядів країн [25]. Вартість одного будинку (рис. 14, зверху), що оснащений усіма мінімальними для життя зручностями (вікна, двері, водопровід, каналізація, сантехніка, електрика) і складається з вітальні, однієї спальної кімнати, невеличкого робочого простору (кабінету), ванної кімнати, оцінюється всього в 4000 доларів (авт. – трохи більше за горезвісну лавку для харківської «підземки»).

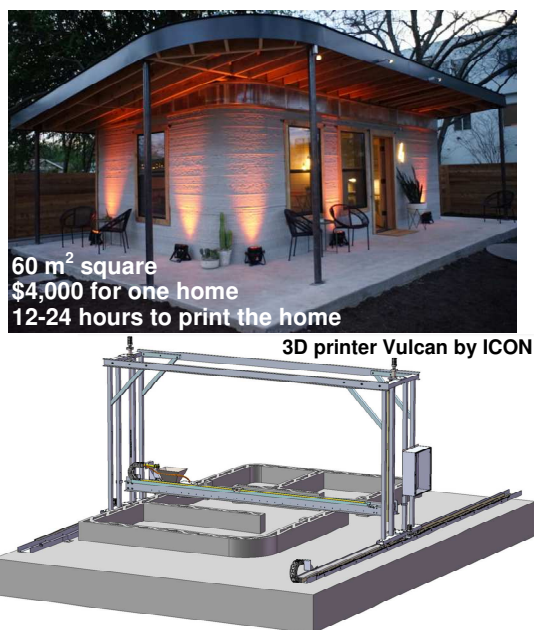


Рис. 14. Прототип 3D-друкованого будинку (зверху) та зовнішній вигляд 3D-принтеру Vulcan (знизу)

Будівництво відбувається за допомоги 3D-принтеру Vulcan розробки компанії ICON (рис. 14, знизу), що представляє собою стаціонарну модульну платформу (на відміну від розглянутого раніше самохідного 3D-принтера The CyBe RC 3Dp), розміщену на рейках. 3D-принтер Vulcan «друкує» будівельною сумішшю, що розроблена саме для нього, об'єкти розміром 6.1 м завширшки, 3.35 м заввишки та необмеженої довжини, оскільки переміщується по рейках та може бути переставлений на нове місце. Вага такого 3D-принтера складає приблизно 900 кг, його можна завантажити в автомобіль та легко перевезти та вста-

новити на будівельному майданчику.

На сайті організації New Story можна ознайомитись з історіями родин, що потребують покращення житлових умов, та залишити добровільний внесок у цю шляхетну справу, при цьому 100 % пожертв буде спрямовано на будівництво, закупівлю матеріалів і найм місцевих працівників для оздоблення будинку.

Ареною для масштабних випробувань 3D-друкованих будинків стане Сальвадор – одна з найбільш і найбільш густонаселених країн Центральної Америки. В спільні плани New Story і ICON входить будівництво у 2019-2020 рр. цілого поселення для малозабезпечених.

Окрім бетону, у якості будівельного матеріалу для зведення соціальних будинків може використовуватись і більш дешевий продукт. Так, італійська компанія WASP (World's Advanced Saving Project) у жовтні 2018 р. продемонструвала цікаве рішення для будівництва доступного житла з ... землі [26]. Собівартість такого екологічного будинку з доволі симпатичним дизайном площею 30 м² склала всього 900 Євро (рис. 15).



Рис. 15. 3D-друкований екологічно чистий будинок

Інструментом для створення екологічно чистих будинків, що друкуються прямо на місці, став модульний 3D-принтер Crane WASP (рис. 16), а основою будівельного матеріалу – звичайна глина. У відсотковому відношенні екологічні «чорнила» складаються з таких компонентів:

- 25% – ґрунт, взятий прямо на місці будівництва (приблизно 30 % глини, 40 % мулу і 30 % піску);
- 40% – подрібнена рисова солома;
- 25% – рисове лушпиння;
- 10% – гідралічне вапно.

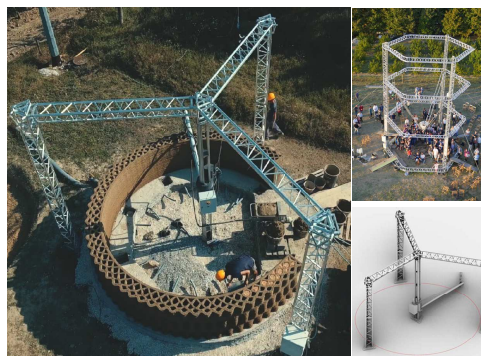
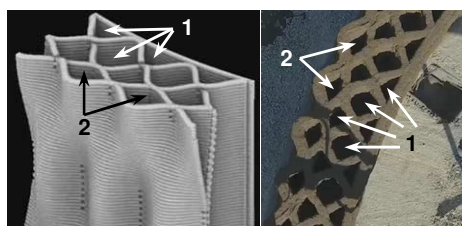


Рис. 16. Модульний 3D-принтер Crane WASP

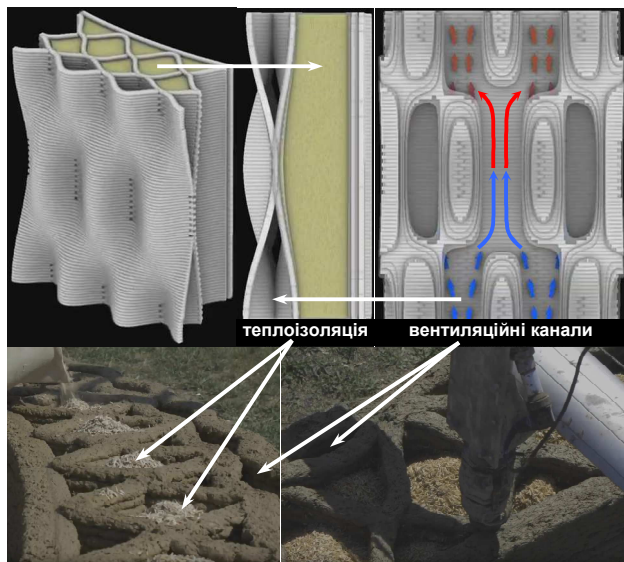
Всі компоненти подрібнюються у однорідну масу і «заправляються» у 3D-принтер.

Розміри друку для одного модуля 3D-принтеру Crane WASP складають 6.6 м у діаметрі і 3 м у висоту та можуть збільшуватись за рахунок добудови нових модулів. Так, наприклад, на зведення стін завтовшки 40 см вказаного будинку площею 30 м² пішло 10 днів.

Доволі оригінальними є форма і конструкція стін екобудинку (рис. 17,а), відтворення яких традиційним будівельним способом є вкрай складним. Поступово, по мірі друку стін, об'єм пор 1 зі сторони внутрішніх стін заповнюється теплоізоляційним шаром – рисовим лушпинням, а пори 2 із зовнішньої сторони будинку залишаються порожніми, створюючи тим самим вентиляційні канали (рис. 17,б), – отже будинок залишається цілковито «дихаючим».



а



б

Рис. 17. Хвилюва пориста структура стін екобудинку

Використання ґрунту, соломи і рисового лушпиння для будівництва будинку обмежує його річну експлуатацію у суворих кліматичних умовах, але в країнах із помірним кліматом, який є характерним для багатьох країн, населення котрих саме і потребує дешевого житла, ця технологія може бути одним з варіантів вирішення проблеми відсутності доступних житлових будинків. Описана технологія 3D-друку і компактний модульний дизайн 3D-принтеру дозволяють перетворити, як заявляють виробники, один 1 га культивованого рисового поля в 100 м² житлової забудови. При цьому, практично всі необхідні для будівництва матеріали вже є безпосередньо під ногами.

На думку автора, описана технологія будівництва може бути застосована навіть і в Україні, не дивля-

чись на її холодні зими. Так, наприклад, її можна використати при зведенні невеличких будиночків відпочинку на узбережжі Чорного та Азовського морів для здачі в оренду відпочивальникам у теплий період року з травня по вересень. Беручи до уваги шалений попит в останні роки на більш-менш комфортне житло для проведення відпустки та зростаючі з кожним роком ціни на оренду житла строк окупності будівництва таких екобудинків не повинен бути дуже довгим.

Приклади з застосування 3D-друку саме у будівництві можна продовжувати доволі довго – не вистачить об'єму журналу! Тому на цьому напрямку зупинимось та далі наведемо ще декілька інших цікавих прикладів застосування адитивних технологій.

3D-друк металевих деталей. Лесть не з самого моменту виникнення адитивних технологій багатьох цікавило перш за все питання можливості друку деталей відразу з металу. Так, на сьогоднішній день, згідно даних міжнародного комітету F42 з адитивних технологій, що базується у ASTM International (American Society for Testing and Materials – американська міжнародна організація, що розробляє і видає стандарти для матеріалів, продуктів, систем та послуг – заснована у 1898 р.), існує 4 адитивні технології з 7-ма різновидами виготовлення металевих деталей на 3D-принтерах [27] (табл. 1). Наведемо короткий опис кожної з технологій.

Технологія **Powder Bed Fusion** передбачає наявність в робочій зоні 3D-принтеру певної поверхні («bed»), на якій спочатку формують шар з металевого порошку (зазвичай застосовується порошок із розміром часток від 5 мкм і більше) і розрівнюють його за допомогою спеціального ролика та леза, формуючи рівний шар матеріалу певної товщини (від 20 мкм і більше). Далі порошок в сформованому тонкому шарі в необхідних місцях обробляють відповідно до підготовленої вихідної CAD-моделі або лазером великої потужності 400-1000 Вт (у випадку **DMLS** або **SLM** технологій) або електронним променем (у випадку **EBM** технології), скріплюючи частинки порошку або шляхом повної плавки металу (**SLM** і **EBM** технології) або частково спікаючи його (**DMLS** технологія) з остаточною термообробкою у печі. Після завершення побудови поточного шару платформа опускається униз на певну задану величину кроку побудови, і на ній формують новий шар – таким чином процес повторюється до повної побудови моделі.

У технології **Directed Energy Deposition**, на відміну від описаної вище, метал у вигляді або стрижня або того ж металевого порошку подається в конкретне місце, куди одночасно підводиться і енергія від або потужного лазера (у випадку **LENS** технології) або електронного променя (у випадку **EBAM** технології) для повної плавки металу і формування деталі шар за шаром. Процес можна дещо порівняти з роботою зварювальника, що підводить електрод до необхідного місця, в якому за рахунок енергії електричної дуги формується зона розплаву.

Технології PBF і DED є двома найбільш розповсюдженими технологіями, за якими світові виробники виготовляють 3D-принтери для друку металом.

Таблиця 1 – Основні адитивні технології виготовлення металевих деталей

№	Назва технології (англ.)	Назва технології (укр. переклад автора)	№	Різновид технології (англ.)	Назва способу (укр. переклад автора)	Компанії, що випускають 3D-принтери за даною технологією	Вартість 3D-принтерів, тис. дол. [28]
1	Powder Bed Fusion (PBF)	Розплавлення порошкового шару	1	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Пряме лазерне спікання металів	EOS (Німеччина) 3D Systems (США)	100-250
			2	Selective Laser Melting (SLM)	Вибіркова лазерна плавка	SLM Solutions (Німеччина) Concept Laser (Німеччина)	
			3	Electron Beam Melting (EBM)	Електронно-променева плавка	Arcam EBM (Швеція)	
2	Directed Energy Deposition (DED)	Осадження спрямованою енергією	4	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Лазерне чисте формування	Optomec (США)	90-250
			5	Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)	Адитивне виробництво електронним променем	Sciaky (США)	
3	Binder Jetting (BJ)	Нанесення струменем сполучної речовини	6	Binder Jetting (BJ)	Нанесення струменем сполучної речовини	ExOne (США)	250-1000
4	Material Jetting (MJ)	Нанесення струменем матеріалу	7	NanoParticle Jetting (NPJ)	Нанесення струменем наночасток	XJet (Ізраїль)	дані відсутні

Так, за результатами аналізу ринку у 2018 р. можна зазначити, що сумарно на дві описані вище технології прийшлося 70 % (54 % – на PBF і 16 % – на DED) від загальної кількості усіх виготовлених 3D-принтерів для друку металом [28].

Загалом на дві наступні технології **Binder Jetting** та **Material Jetting** припадає 16 % ринку. Їх спільною рисою є відсутність застосування потужних джерел тепла та використання струменевого принципу розбризкування або сполучної речовини – так званого байндера (у випадку **BJ** технології) або ж відразу матеріалу деталі (у випадку **MJ** технології, а саме **NanoParticle Jetting (NPJ)** технології).

У технології **Binder Jetting** на першому етапі на шар порошкового металу в необхідні місця відповідно до CAD-моделі струменем наноситься рідкий байндер (у якості якого може виступати, наприклад, фотополімер), що скріплює частинки металу і формує воксели (тривимірні пікселі) – найменші елементи у тривимірній графіці. Після нанесення байндера платформа опускається на задану величину, і джерело УФ-випромінювання засвічує і затверджує рідкий фотополімер. Далі формується новий тонкий шар металу і на нього знову селективно розбризкується байндер – процес повторюється до повної побудови моделі, що являє собою листову металеву текстуру, скріплену байндером. На другому етапі робочу камеру з побудованою моделлю всередині невикористаного металевого порошку знімають з 3D-принтеру і поміщають в піч для попереднього розігріву і затвердіння. Процес протікає при температурі 200-260 °C протягом 6-10 годин в залежності від розмірів моделі. На третьому етапі вручну за допомогою невеликого пілососа, набору щіток і стисненого повітря збирається невикористаний металевий порошок з робочої камери. Цей порошок повністю придатний для повторного використання. Вільна від порошку модель розміщується для спікання в спеціальній високотемпературній печі при температурі близько 900-1400 °C в залежності від матеріалу, а інколи, для певних матеріалів, застосову-

ється гаряче ізостатичне пресування. Після спікання деталі готові до використання.

Замість порошкового металу у технології **Binder Jetting** може застосовуватись плакований металевий порошок, який попередньо змішується в спеціальному міксері зі сполучною речовиною, яка вкриває тонким шаром частинки порошку – отримуємо металеву частину, вкриту легкоплавким матеріалом. Далі з цих часток у 3D-принтері формується шар, лазер невеликої потужності розплавляє сполучну речовину і «склеює» частинки порошку між собою. Отримана модель має загально прийняту назву – «грін-модель». Потім цю модель очищають від часток порошку, і поміщають в піч із захисним середовищем (зазвичай азотом), де при температурі близько 1000-1100 °C випаровують сполучну речовину і проводять процес інфільтрації – просочення моделі розплавленою бронзою. У печі бронза розплавляється і за рахунок капілярного ефекту проникає в структуру грін-моделі. Таким чином, на виході отримуємо деталь з матеріалу, що представляє собою конгломерат, що складається на 60 % зі сталі і на 40 % – з бронзи. Завдяки використанню бронзи, температура плавлення якої нижче за температуру плавлення металевого порошку, у грін-моделі заповнюються невеликі простори, що збільшує щільність кінцевої деталі.

Остання на сьогоднішній день технологія друку металом – це технологія **Material Jetting**, що у 2016 р. була запатентована ізраїльською компанією XJet під власною назвою **NanoParticle Jetting (NPJ)** [29]. Детальна інформація щодо процесу створення металевих деталей за даною технологією відсутня (як і вартість 3D-принтерів) – є загальний опис у вигляді прес-релізу з невеликими відеорядами. Тому коротко суть технології полягає у наступному. Як зрозуміло з самої назви технології, друк відбувається наночастинками, а, точніше, колоїдним розчином – твердим нанопорошком у рідкій суспензії, що завантажується у спеціальні герметичні картриджі. В окремому картриджі знаходиться легкоплавкий матеріал для друку підтри-

муючих структур, який легко можна видалити при незначній температурі. А далі процес дещо нагадує струменево-крапельний друк на звичайному паперовому принтері. Колоїдний розчин і окремо легкоплавкий матеріал для підтримок подаються у систему, що складається з 24 головок з 512 соплами в кожній, і розбризкуються зі швидкістю 221 крапля в секунду на підготовлену поверхню, утворюючи тонкий шар майбутньої деталі. Після нанесення кожного шару проводиться термічна обробка тепловими лампами з метою видалення рідини з колоїдного розчину і попереднього спікання металевих частинок. Процес повторюється шар за шаром (товщина шару варіюється в межах 10-15 мкм), а по завершенні друку модель промивається і спікається в готовий виріб, при якому підтримуючі структури випаровуються. Технологія NanoParticle Jetting дозволяє друкувати як металеві так і керамічні вироби з високою щільністю і роздільною здатністю та мінімальною остаточною обробкою. Так, щільність металевих виробів після спікання складає 99.9 %, а за своєю структурою деталі практично ідентичні литим.

Описана технологія реалізована компанією XJet у двох 3D-принтерах: Carmel 700 – для друку металевих деталей (рис. 18) з розмірами 500×140×200 мм, та Carmel 1400 – 500×280×200 мм.



Рис. 18. Приклади деталей, що виготовлені за технологією NanoParticle Jetting

Адитивні технології створення деталей з металів реалізуються як через доволі коштовне (табл. 1) промислове устаткування для застосування в галузях важкого машинобудування, транспорту, медицини, ювелірної промисловості тощо, так і через невеликі настільні моделі 3D-принтерів, але які, на превеликий жаль, на сьогоднішній день також є дуже дорогими. Так, американська компанія Additec презентувала настільний 3D-принтер μ Printer, що має можливість друкувати як металевими порошками, так і звичайним зварювальним дротом (рис. 19,а) [30].

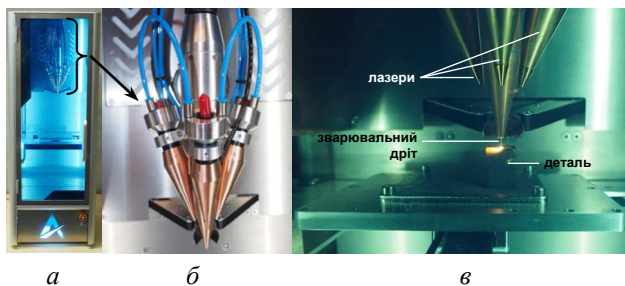


Рис. 19. Настільний 3D-принтер Additec μ Printer

Технологія передбачає одночасне застосування трьох лазерів (рис. 19,б) сумарною потужністю 600 Вт (є можливість додатково встановити ще два лазери і довести сумарну потужність до 1 кВт), що фокусуються та розплавляють стандартний зварювальний дріт діаметром 0.6-1 мм (рис. 19,в). Процес відбувається в захисному середовищі інертного газу, у якості якого застосовується аргон, тому процес дещо нагадує зварювання за технологією MIG (Metal Inert Gas Welding). Розмір області побудови металевих моделей є не досить великим – 160×120×450 мм (габаритні розміри 3D-принтеру 390×390×1100 мм, вага в залежності від комплектації складає 75-100 кг), на відміну від загальної вартості – 90000 доларів.

Є надія, що подальший розвиток цього напрямку адитивних технологій спонукатиме к виникненню конкуренції на ринку, що сприятиме зниженню вартості і збільшенню доступності 3D-принтерів для створення металевих деталей.

Наприкінці статті хотілося б навести дані щодо прогнозу розвитку адитивних технологій у світі. Так, згідно даних дослідницької та консалтингової компанії International Data Corporation (IDC) обсяг загальносвітових витрат на адитивні технології (виробництво апаратного забезпечення, витратних матеріалів, програмного забезпечення, профільні послуги тощо) в 2019 р. складе 13.8 млрд. доларів, а середньорічні темпи приросту складатимуть близько 20 % [31]. За оцінкою аналітиків IDC до 2022 р. обсяг ринку оцінюється вже в 22.7 млрд. доларів при середньому річному прирості протягом п'ятирічного періоду на рівні 19.1 %. Біля 67 % від загальних витрат припадатиме на обладнання та витратні матеріали – 5.3 і 4.2 млрд. доларів відповідно, а ринок послуг посяде третє місце – 3.8 млрд. Найбільшим попитом будуть користуватися послуги з 3D-друку деталей на замовлення і системної інтеграції.

Провідною галуззю в плані застосування адитивних технологій буде виробництво, чия частка буде становити більше половини від загальних витрат. Друге місце займатимуть медицина та охорона здоров'я з прогнозованим обсягом замовлень на рівні 1.8 млрд. доларів, третє – освіта (1.2 млрд.), четверте – ринок професійних послуг (898 млн.). Найбільш швидке зростання попиту покажуть медицина та охорона здоров'я (29.8 %) і транспортна галузь (28.3 %).

Найбільш затребуваними будуть прототипи, запасні частини і компоненти нових товарів. У виробництві на ці 3 категорії доведеться близько 43 % від загального обсягу замовлень. Четверте і п'яте місця займуть товари для медичного сектора – стоматологічні вироби та медичні засоби. Найвище зростання попиту буде спостерігатися в секторі біодруківаних матеріалів (тканини, кістки, органи) і стоматології – 42.9 % і 33.1 % відповідно.

Провідним регіоном в плані попиту залишатиметься США, де на адитивні технології буде витрачено майже 5 млрд. доларів. Друге місце займають Західна Європа (3.6 млрд.), третє – Китай (майже 2 млрд.). З іншого боку, найкращі темпи зростання протягом п'ятирічного періоду покажуть Латинська Америка (25.3 % в рік) і знову Китай (21.6 % в рік).

Висновки. За останні роки в світі спостерігається надзвичайно широке впровадження адитивних технологій у численні сфери людського життя. Технології 3D-друку вже перейшли етап зародження і знаходять застосування не тільки у промисловому секторі, але і в інших галузях. Багатьма спеціалістами 3D-друк вважається простим і ефективним рішенням для спрощення технологічних процесів при виготовленні комплектуючих деталей, що використовуються в самих різних сферах діяльності. Універсальність сучасних 3D-принтерів дозволяє за їх допомогою зводити будинки, створювати компоненти для машин і механізмів, що за своїми характеристиками переважають деталі, що вироблені традиційними методами машинобудування. Не менш затребуваними адитивні технології є і в медицині – пройде ще небагато часу і все частіше з'являтимуться люди з «надрукованими» органами. Тому дуже важливим завданням для вітчизняної промисловості, а також для науки і освіти є недопущення відставання від надзвичайно швидкого розвитку адитивних технологій у світі. Саме тому було вирішено ввести в навчальний процес кафедри «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» дисципліну «Моделювання та друк тривимірних об'єктів на 3D-принтері» з метою як теоретичної підготовки і ознайомлення студентів з основними засадами технології 3D-друку, так і отримання ними практичних навичок з роботи і обслуговування 3D-принтерів. Але, звичайно, неможливо навчитись чому-небудь лише за лекціями, за слайдами, за плакатами – потрібна матеріальна база для проведення практичних занять. Тому перед кафедрою гостро постало питання придбання хоча б одного, на перший час, 3D-принтеру для початку процесу підготовки студентів. Але вартість 3D-принтерів з більш-менш непоганими технічними характеристиками, навіть у середньому бюджетному класі, залишається доволі високою, як для ВНЗ, не кажучи вже про можливості однієї кафедри.

Але завдячуючи отриманню кафедрою гранту німецького фонду Олександра фон Гумбольдта на придбання обладнання для наукових досліджень у розмірі 20 тис. євро [32] з'явилась можливість придбання сучасного 3D-принтеру Flashforge Creator Pro, завдяки чому студенти мають можливість бути в тренді сучасних затребуваних технологій та отримувати якісну підготовку, що, безперечно, сприятиме їх подальшому успішному працевлаштуванню.

Список літератури

1. Kielan Kielan P. System of 3D printers cooperating via the Internet – studying the impact of network delays on the operation of the system // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2018. – vol.1. – no.12. – pp. 196-199. doi: **10.15199/48.2018.12.43**.
2. Cichoń K. Zastosowanie drukarek 3D w przemyśle // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2017. – vol.1. – no.3. – pp. 158-160. doi: **10.15199/48.2017.03.36**.
3. Zhang F., Tuck C., Hague R., He Y., Saleh E., Li Y., Sturgess C., Wildman R. Inkjet printing of polyimide insulators for the 3D printing of dielectric materials for microelectronic applications // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2016. – vol.133. – no.18. – p. 43361. doi: **10.1002/app.43361**.
4. Zenou M., Kotler Z. Printing of metallic 3D micro-objects by laser induced forward transfer // *Optics Express*. – 2016. – vol.24. – no.2. – p. 1431-1446. doi: **10.1364/oe.24.001431**.

5. Dudek P. FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2013. – vol.58. – no.4. – pp. 1415-1418. doi: **10.2478/amm-2013-0186**.
6. Греčko А.М. Технологии быстрого прототипирования – от детской игрушки до мирового господства // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2013. – №65(1038). – С. 14-36.
7. Електронний pecypc: <https://3dua.com.ua/page/3d-pechat-protezo-dlya-zhertv-voyny>.
8. Електронний pecypc: <https://openbionics.com/bionic-heroes>.
9. Електронний pecypc: <http://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-rib-implant-saves-a-life-at-tokuda-hospital-bulgaria-146000>.
10. Електронний pecypc: <https://3dgence.com/en/3d-printed-rib-implanted-in-the-human-body>.
11. Yang F., Tadeballi V., Wiley B.J. 3D Printing of a Double Network Hydrogel with a Compression Strength and Elastic Modulus Greater than those of Cartilage // *ACS Biomaterials Science & Engineering*. – 2017. – vol.3. – no.5. – pp. 863-869. doi: **10.1021/acsbiomaterials.7b00094**.
12. Електронний pecypc: <https://today.duke.edu/2017/04/3-d-printable-implants-may-ease-damaged-knees>.
13. Електронний pecypc: <https://www.utoronto.ca/news/u-t-researchers-develop-portable-3d-skin-printer-repair-deep-wounds>.
14. Gungor-Ozkerim P.S., Inci I., Zhang Y.S., Khademhosseini A., Dokmeci M.R. Bioinks for 3D bioprinting: an overview // *Biomaterials Science*. – 2018. – vol.6. – no.5. – pp. 915-946. doi: **10.1039/c7bm00765e**.
15. Електронний pecypc: <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/3d-bioprinting-bioinks.html>.
16. Електронний pecypc: <https://www.ncl.ac.uk/press/articles/latest/2018/05/first3dprintingofcorneas>.
17. Isaacson A., Swioklo S., Connon C.J. 3D bioprinting of a corneal stroma equivalent // *Experimental Eye Research*. – 2018. – vol.173. – pp. 188-193. doi: **10.1016/j.exer.2018.05.010**.
18. Електронний pecypc: <https://www.3dprintingmedia.network/3d-printed-footbridge-shanghai>.
19. Електронний pecypc: <https://cybe.eu/3d-concrete-printers>.
20. Електронний pecypc: <https://cybe.eu/cybemortar>.
21. Електронний pecypc: <https://www.tue.nl/en/news/news-overview/14-02-2018-suikers-equations-prevent-3d-printed-walls-from-collapsing-or-falling-over>.
22. Suiker A.S.J. Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2018. – vol.137. – pp. 145-170. doi: **10.1016/j.ijmecsci.2018.01.010**.
23. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – vol.106. – pp. 103-116. doi: **10.1016/j.cemconres.2018.02.001**.
24. Електронний pecypc: <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2010/12/27/5720185>.
25. Електронний pecypc: <https://www.iconbuild.com/new-story>.
26. Електронний pecypc: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp>.
27. Електронний pecypc: <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>.
28. Електронний pecypc: <https://www.aniwaa.com/best-of/3d-printers/best-metal-3d-printer>.
29. Електронний pecypc: <https://xjet3d.com/technology>.
30. Електронний pecypc: <https://www.additec.net/%CE%BCprinter>.
31. Електронний pecypc: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-prognosis-of-3d-the-global-spending-on-additive-technology-in-the>.
32. Електронний pecypc: <http://www.kpi.kharkov.ua/ukr/2016/10/24/vcheni-hpi-vigrali-grant-nimetskogo-fondu>.

References (transliterated)

1. Kielan Kielan P. System of 3D printers cooperating via the Internet – studying the impact of network delays on the operation of the system. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018, vol.1, no.12, pp. 196-199. doi: **10.15199/48.2018.12.43**.
2. Cichoń K. Zastosowanie drukarek 3D w przemyśle. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2017, vol.1, no.3, pp. 158-160. doi: **10.15199/48.2017.03.36**.

3. Zhang F., Tuck C., Hague R., He Y., Saleh E., Li Y., Sturgess C., Wildman R. Inkjet printing of polyimide insulators for the 3D printing of dielectric materials for microelectronic applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, vol.133, no.18, p. 43361. doi: **10.1002/app.43361**.
4. Zenou M., Kotler Z. Printing of metallic 3D micro-objects by laser induced forward transfer. *Optics Express*, 2016, vol.24, no.2, p. 1431-1446. doi: **10.1364/oe.24.001431**.
5. Dudek P. FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol.58, no.4, pp. 1415-1418. doi: **10.2478/amm-2013-0186**.
6. Grechko A.M. Rapid prototyping technologies – from children's toy to world domination. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2013, iss.65, pp.14-36.
7. <https://3dua.com.ua/page/3d-pechat-protezovaliya-zhertv-vojny>.
8. <https://openbionics.com/bionic-heroes>.
9. <http://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-rib-implant-saves-a-life-at-tokuda-hospital-bulgaria-146000>.
10. <https://3dgence.com/en/3d-printed-rib-implanted-in-the-human-body>.
11. Yang F., Tadepalli V., Wiley B.J. 3D Printing of a Double Network Hydrogel with a Compression Strength and Elastic Modulus Greater than those of Cartilage. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2017, vol.3, no.5, pp. 863-869. doi: **10.1021/acsbomaterials.7b00094**.
12. <https://today.duke.edu/2017/04/3-d-printable-implants-may-ease-damaged-knees>.
13. <https://www.utoronto.ca/news/u-t-researchers-develop-portable-3d-skin-printer-repair-deep-wounds>.
14. Gungor-Ozkerim P.S., Inci I., Zhang Y.S., Khademhosseini A., Dokmeci M.R. Bioinks for 3D bioprinting: an overview. *Biomaterials Science*, 2018, vol.6, no.5, pp. 915-946. doi: **10.1039/c7bm00765e**.
15. [https://www.sigmaldrich.com/technical-](https://www.sigmaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/3d-bioprinting-bioinks.html)
16. <https://www.ncl.ac.uk/press/articles/latest/2018/05/first3dprintingofcorneas>.
17. Isaacson A., Swioklo S., Cannon C.J. 3D bioprinting of a corneal stroma equivalent. *Experimental Eye Research*, 2018, vol.173, pp. 188-193. doi: **10.1016/j.exer.2018.05.010**.
18. <https://www.3dprintingmedia.network/3d-printed-footbridge-shanghai>.
19. <https://cybe.eu/3d-concrete-printers>.
20. <https://cybe.eu/cybemortar>.
21. <https://www.tue.nl/en/news/news-overview/14-02-2018-suikers-equations-prevent-3d-printed-walls-from-collapsing-or-falling-over>.
22. Suiker A.S.J. Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, vol.137, pp. 145-170. doi: **10.1016/j.ijmecsci.2018.01.010**.
23. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research*, 2018, vol.106, pp. 103-116. doi: **10.1016/j.cemconres.2018.02.001**.
24. <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2010/12/27/5720185>.
25. <https://www.iconbuild.com/new-story>.
26. <https://www.3dwasps.com/en/3d-printer-house-crane-wasp>.
27. <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>.
28. <https://www.aniwaa.com/best-of-3d-printers/best-metal-3d-printer>.
29. <https://xjet3d.com/technology>.
30. <https://www.additec.net/%CE%BCprinter>.
31. <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-prognosis-of-idc-the-global-spending-on-additive-technology-in-the>.
32. <http://www.kpi.kharkov.ua/ukr/2016/10/24/vcheni-hpi-vigrali-grant-nimetskogo-fondu>.

Надійшла (received) 20.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Гречко Олександр Михайлович (Гречко Александр Михайлович, Grechko Aleksandr Myhaylovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7872-8585>; e-mail: a.m.grechko@gmail.com.